

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-277393

(P2002-277393A)

(43) 公開日 平成14年9月25日(2002.9.25)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	P I	7-73-7*(参考)
G 0 1 N 21/35		G 0 1 N 21/35	Z 2 G 0 5 9
21/41		21/41	Z

審査請求 未請求 請求項の数10 O L (全 20 頁)

(21) 出願番号 特開2001-74551(P2001-74551)

(22) 出願日 平成13年3月15日(2001.3.15)

(71) 出願人 592171153

株式会社橋本ニコン

栃木県大田原市実取770番地

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72) 発明者 宇佐見 暉

栃木県大田原市実取770番地 株式会社橋

本ニコン内

(74) 代理人 100068770

弁理士 西宮 暉

Fターム(参考) 2G15B A602 E201 E202 FF01 FF06

FF09 G201 H001 J114 JJ24

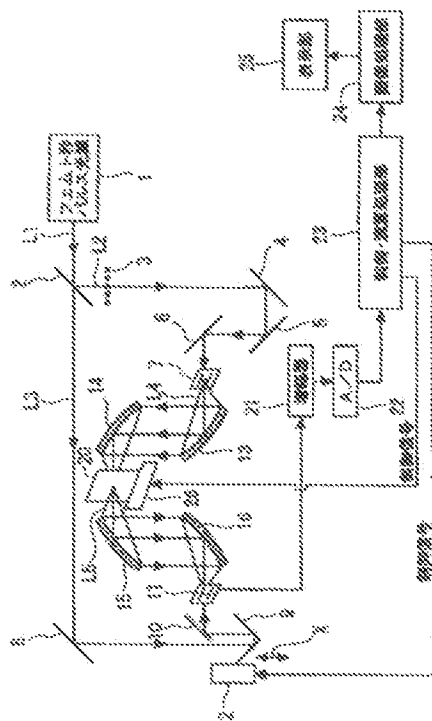
KK01 MM01

(54) 【発明の名称】 測定方法及び装置、並びに、イメージ化方法及び装置

(57) 【要約】

【課題】 計算量を低減しつつ安定して精度良く複素屈折率を測定する。

【解決手段】 発生部7で発生したテラヘルツパルス光を被測定物20に透過させる。その透過光を検出器11で検出し、所定周波数の振幅透過率及び位相差を得る。これらと被測定物20の複素屈折率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により被測定物20の複素屈折率を求める。この式は、テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を反映したものである。前記逐次近似において、複素屈折率の近似解を与えて複素屈折率の新たな近似解を得るに際し、光が被測定物20の周囲の媒質から被測定物20へ入射するときの透過率、光が被測定物20から媒質へ出射するときの透過率、及び、多重反射に基づく項を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得る。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定方法であって、

テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを用いて、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を透過して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する段階と、

前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態であるいは前記光路上に前記被測定物も前記試料も配置しない状態で、前記発生部から発生されて前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算する演算段階と、

を備え、

前記演算段階は、(a) 前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める段階と、(b) 前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める段階と、(c) 前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める段階と、を有し、

前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を無視したものであり、

前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率及び光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得る、ことを特徴とする測定方法、

【請求項2】 被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定方法であって、

テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを用いて、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を透過して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する段階と、

前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態であるいは前記光路上に前記被測定物も前記試料

も配置しない状態で、前記発生部から発生されて前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算する演算段階と、

を備え、

前記演算段階は、(a) 前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める段階と、(b) 前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める段階と、(c) 前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める段階と、を有し、

前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を反映したものであり、

前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率、光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率、及び、前記多重反射に基づく項を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得る、ことを特徴とする測定方法、

【請求項3】 被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定方法であって、

テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを用いて、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を反射して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する段階と、

前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態で、前記発生部から発生され前記試料を反射して前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算する演算段階と、

を備え、

前記演算段階は、(a) 前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める段階と、(b) 前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前

10

20

30

40

50

記所定周波数の位相との位相差を求める段階と、(c) 前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める段階と、を有し、

前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を無視するとともに、前記被測定物の前記検出部側の面で1回のみ反射した光及び前記被測定物の前記検出部と反対側の面で1回のみ反射した光を反映

したものであり、
前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率及び反射率、並びに、光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率及び反射率を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得る、ことを特徴とする測定方法、

【請求項4】 被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定方法であって、

テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを用いて、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を反射して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する段階と、

前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態で、前記発生部から発生され前記試料を反射して前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算する演算段階と、

を備え、

前記演算段階は、(a) 前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める段階と、(b) 前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める段階と、(c) 前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める段階と、を有し、

前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を反映したものであり、

前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近

似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率及び反射率、光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率及び反射率、並びに、前記多重反射に基づく項を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得る、

ことを特徴とする測定方法、

【請求項5】 被測定物の複素屈折率又は複素誘電率あるいはこれらのいずれかに基づく物性値の、分布に従って、前記被測定物をイメージ化するイメージ化方法において、前記被検物の個々の部位の複素屈折率又は複素誘電率の測定に、請求項1乃至4のいずれかに記載の測定方法を適用することを特徴とするイメージ化方法、

【請求項6】 被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定装置であって、

テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを含み、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を透過して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する計測時系列波形取得部と、前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態であるいは前記光路上に前記被測定物も前記試料も配置しない状態で、前記発生部から発生されて前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算する演算部と、

を備え、

前記演算部は、(a) 前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める振幅率演算部と、

(b) 前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める位相差演算部と、(c) 前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める逐次近似部と、を有し、

前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を無視したものであり、

前記逐次近似部は、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率及び光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透

率を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得る、ことを特徴とする測定装置。

【請求項7】 被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定装置であって、

テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを含み、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を透過して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する計測時系列波形取得部と、前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態であるいは前記光路上に前記被測定物も前記試料も配置しない状態で、前記発生部から発生されて前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算する演算部と、を備え、

前記演算部は、(a) 前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める振幅率演算部と、

(b) 前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める位相差演算部と、(c) 前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める逐次近似部と、を有し、

前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を反映したものであり、

前記逐次近似部は、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率、光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率、及び、前記多重反射に基づく項を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得る、ことを特徴とする測定装置。

【請求項8】 被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定装置であって、

テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを含み、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を反射して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である

計測時系列波形を取得する計測時系列波形取得部と、前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態で、前記発生部から発生され前記試料を反射して前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算する演算部と、を備え、

前記演算部は、(a) 前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める振幅率演算部と、

(b) 前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める位相差演算部と、(c) 前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める逐次近似部と、を有し、

前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を無視するとともに、前記被測定物の前記検出部側の面で1回のみ反射した光及び前記被測定物の前記検出部と反対側の面で1回のみ反射した光を反映したものであり、

前記逐次近似部は、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率及び反射率、並びに、光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率及び反射率を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得る、ことを特徴とする測定装置。

【請求項9】 被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定装置であって、

テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを含み、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を反射して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する計測時系列波形取得部と、前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態で、前記発生部から発生され前記試料を反射して前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算する演算部と、を備え、

前記演算部は、(a) 前記計測時系列波形をフーリエ変

換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める振幅率演算部と。

(b) 前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める位相差演算部と、(c) 前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める逐次近似部と、を有し。

前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を反映したものであり、

前記逐次近似部は、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率及び反射率、光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率及び反射率、並びに、前記多重反射に基づく項を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得る。

ことを特徴とする測定装置。

【請求項10】 被測定物の複素屈折率又は複素誘電率あるいはこれらのいずれかに基づく物性値の、分布に従って、前記被測定物をイメージ化するイメージ化装置において、請求項5乃至9のいずれかに記載の測定装置を含むことを特徴とするイメージ化装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定方法及び装置、並びに、これを用いた被測定物のイメージ化方法及び装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】物質はその性質に依存した固有の屈折率を持つ。また、屈折率は、周波数（したがって、波数）により異なる値をとり、その屈折率の周波数依存性も物質に固有のものである。そこで、物質の性質を調べるために、光学的に物質の屈折率を測定することが広く行われている。

【0003】フーリエ変換赤外分光法（FTIR法）などの従来の分光法によって物質の透過光又は反射光を測定した場合に得られる情報は、エネルギー透過率又はエネルギー反射率のみであった。その測定結果から物質の屈折率（一般に複素数）を求めるためには、エネルギー透過率又はエネルギー反射率の周波数依存性を測定し、その結果に対して、ある周波数領域で理論式のパラメータを非線形最小二乗法などにより最適化していた。

【0004】このような手法には複雑な計算に伴うため、解析に時間がかかるなどの問題点があった。また、

ある特定の周波数に対する複素屈折率のみが必要な場合であっても、屈折率の周波数依存性を求めるなどの煩雑な手順が必要であった。

【0005】一方、テラヘルツ分光法を利用して被測定物の複素屈折率を測定する測定方法が、デュヴィラレットら（Lionel Duvillearet, Frederic Garet, and Jean-Louis Coutaz）の論文（“A Reliable Method for Extraction of Material Parameters in Terahertz Time-Domain Spectroscopy”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.2, No.3, pp.739-746（1996））に開示されている。

【0006】テラヘルツ分光法では、振幅情報と位相情報の2つの情報を同時に得ることができる。前記論文には、測定から得られる振幅透過率及び位相と複素屈折率との関係を示す式が開示されている。測定から得られる値が2つ（振幅透過率と位相差）であるのに対し、未知数が2つ（複素屈折率の実部と虚部）であるから、各周波数において前記式に基づく2元連立方程式を解くことにより、各周波数における複素屈折率を求めることが可能である。したがって、屈折率の波長依存性を求めるなどの煩雑な手順が不要となる。

【0007】しかしながら、この場合、前記2元連立方程式は非常に複雑な形になってしまうため、そのまま解くことは極めて困難である。そこで、前記論文に開示された測定方法では、被測定物の内部での多重反射を無視する場合において、最適値を与えると0になる常に負でない評価関数（error function）を導入し、この評価関数を最小化することにより複素屈折率を求める手法を採用している。さらに、前記論文には、被測定物の内部での多重反射を考慮する場合において、前記多重反射に基づく項に関して評価関数を導入した上で、多重反射に基づく項を振動として取り扱い、逐次近似により複素屈折率を求める手法を開示している。この逐次近似においては、複素屈折率の近似解を与えて複素屈折率の新たな近似解を得るに際し、多重反射に基づく項のみを、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱い、この既知数に基づいて前記評価関数を最小化することにより、新たな近似解を得ている。つまり、逐次近似の際に新たな近似解を得る度に、毎回、評価関数最小化を行う。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】前記論文に開示された測定方法は、フーリエ変換赤外分光法等により複素屈折率を測定する場合に比べて、屈折率の波長依存性を求めるなどの煩雑な手順が不要となるので、優れている。また、前記論文に開示された測定方法は、多重反射を無視する場合に、評価関数を利用することにより複素屈折率を求めるので、複雑な形の式をそのまま解く場合に比べれば、計算量が低減され、測定時間の短縮化を図ることができる。さらに、多重反射を考慮する場合には、その影響を逐次近似で取り扱うことにより、安定にかつ精度良

く複素屈折率を求めることができる。

【0009】しかしながら、前記論文に開示された測定方法では、逐次近似の際に新たな近似解を得る度に評価関数を最小化する計算を行わなければならない、複素屈折率の測定のための計算量は非常に多くなる。

【0010】以上、複素屈折率を測定する場合について述べたが、周知のように複素屈折率と複素誘電率とは一定の関係を有していることから、被測定物の複素誘電率を測定する場合についても同様である。

【0011】本発明は、このような事情に鑑みてなされたもので、屈折率の波長依存性を求めるなどの煩雑な手順が不要となり、しかも、計算量を低減しつつ安定して精度良く複素屈折率又は複素誘電率を測定することができる測定方法及び装置、並びに、これを用いた被測定物のイメージ化方法及び装置を提供することを目的とする。

【0012】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決するため、本発明の第1の態様による測定方法は、被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定方法であつて、(1)テラヘルツパルス光の発生源と該発生源から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを用いて、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を透過して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する段階と、(2)前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態であるいは前記光路上に前記被測定物も前記試料も配置しない状態で、前記発生源から発生されて前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算する演算段階と、を備えたものである。前記演算段階は、(a)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める段階と、(b)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める段階と、(c)前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める段階と、を有する。そして、この第1の態様では、前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を無視したものであり、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲

の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率及び光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得る。

【0013】この第1の態様によれば、テラヘルツ分光法を利用して、基準時系列波形と計測時系列波形との関係に基づいて、被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算するので、フーリエ変換や分光法等により複素屈折率を測定する場合と異なり、屈折率の波長依存性を求めるなどの煩雑な手順が不要となる。

【0014】そして、前記第1の態様によれば、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率及び光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得ている。したがって、前記論文に開示されている測定方法と異なり、単純な反復計算だけを用いて計算量を低減しつつ安定して精度良く複素屈折率又は複素誘電率を測定することができる。

【0015】なお、前記第1の態様による測定方法は、複素屈折率又は複素誘電率を最終的な測定結果とする場合のみならず、他の物性値を所望の最終的な測定結果とする場合において、当該物性値を得るための途中段階として複素屈折率又は複素誘電率を得る場合にも、適用することができることは、言うまでもない。この点は、後述する第2乃至第4の態様及び第6乃至第9の態様についても、同様である。

【0016】本発明の第2の態様による測定方法は、被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定方法であつて、(1)テラヘルツパルス光の発生源と該発生源から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを用いて、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を透過して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する段階と、(2)前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態であるいは前記光路上に前記被測定物も前記試料も配置しない状態で、前記発生源から発生されて前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算する演算段階と、を備えたものである。前記演算段階は、(a)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める段階と、(b)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める段階と、(c)前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める段階と、を有する。そして、この第2の態様では、前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を無視したものであり、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲

位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める段階と、(c)前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める段階と、を有する。そして、この第2の態様では、前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を反映したものであり、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率、光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率、及び、前記多重反射に基づく項を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得る。

【0017】前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式として、前記第1の態様ではテラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を無視したものであったのに対し、前記第2の態様ではこの多重反射を反映したものが用いられている。したがって、前記第2の態様によれば、前記第1の態様に比べてより精度良く複素屈折率及び複素誘電率を測定することができる。そして、前記第2の態様では、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率及び光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率のみならず、前記多重反射に基づく項を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得ている。したがって、前記第2の態様によれば、前記論文に開示されている測定方法と異なり評価関数を用いることなく、計算量を低減しつつ安定して精度良く複素屈折率又は複素誘電率を測定することができる。

【0018】本発明の第3の態様による測定方法は、被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定方法であって、(1)テラヘルツパルス光の発生源と該発生源から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを用いて、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を反射して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する段階と、(2)前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態で、前記発生源から発生され前記試料を反射して前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又

は複素誘電率を演算する演算段階と、を備えたものである。前記演算段階は、(a)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める段階と、(b)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める段階と、

(c)前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める段階と、を有する。そして、この第3の態様では、前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を無視するとともに、前記被測定物の前記検出部側の面で1回のみ反射した光及び前記被測定物の前記検出部と反対側の面で1回のみ反射した光を反映したものであり、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率及び反射率、並びに、光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率及び反射率を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得る。

【0019】前記第1の態様では被測定物を通じた透過光が用いられているのに対し、前記第3の態様では被測定物で反射した反射光が用いられている。前記第3の態様によれば、テラヘルツ分光法を利用して、基準時系列波形と計測時系列波形との関係に基づいて、被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算するので、フーリエ変換外分光法等により複素屈折率を測定する場合と異なり、屈折率の波長依存性を求めるなどの煩雑な手順が不要となる。

【0020】そして、前記第3の態様によれば、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率及び反射率、並びに、光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率及び反射率を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得ている。したがって、前記論文に開示されている測定方法と異なり、単純な反復計算だけを用いて計算量を低減しつつ安定して精度良く複素屈折率又は複素誘電率を測定することができる。また、前記第3の態様では、前記振幅率及び前記位相差と複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式として、多重反射は無視されているものが使用されているが、被測定物の前記検出部側の面で1回のみ反射した光及び被測定物の前記検出部と反対側の面で1回のみ反射した光を反映したものが用いられているので、この反対側の面で

1回のみ反射した光も無視したものを用いる場合に比べて、より精度良く複素屈折率又は複素誘電率を測定することができる。

【0021】本発明の第4の態様による測定方法は、被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定方法であって、(1)テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを用いて、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を反射

して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する段階と、(2)前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態で、前記発生部から発生され前記試料を反射して前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算する演算段階と、を備えたものである。前記演算段階は、(a)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める段階と、(b)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める段階と、

(c)前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める段階と、を有する。そして、この第4の態様では、前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を反映したものであり、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率及び反射率、光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率及び反射率、並びに、前記多重反射に基づく項を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得る。

【0022】前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式として、前記第3の態様ではテラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を無視したものであったのに対し、前記第4の態様ではこの多重反射を反映したものが用いられている。したがって、前記第4の態様によれば、前記第3の態様に比べてより精度良く複素屈折率及び複素誘電率を測定することができる。そして、前記第4の態様では、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな

近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率及び反射率、並びに、光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率及び反射率のみならず、前記多重反射に基づく項を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得ている。したがって、前記第4の態様によれば、前記論文に開示されている測定方法と異なり評価関数を用いることなく、計算量を低減しつつ安定して精度良く複素屈折率又は複素誘電率を測定することができる。

【0023】本発明の第5の態様によるイメージ化方法は、被測定物の複素屈折率又は複素誘電率あるいはこれらのいずれかに基づく物性値の、分布に従って、前記被測定物をイメージ化するイメージ化方法において、前記被測定物の個々の部位の複素屈折率又は複素誘電率の測定に、前記第1乃至第4のいずれかの態様による測定方法を適用するものである。前記物性値は、複素屈折率又は複素誘電率と関連のあるものであればよく、例えば、半導体のキャリア密度や移動度などを挙げることができる。

【0024】この第5の態様によれば、前記第1乃至第4のいずれかの態様による測定方法が適用されるので、被測定物の個々の部位の複素屈折率又は複素誘電率を計算量を低減しつつ安定して精度良く得ることができる。したがって、イメージ化のための計算量が全体として大幅に低減され、その利点は著しい。

【0025】本発明の第6の態様による測定装置は、被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定装置であって、(1)テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを含み、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を透過して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する計測時系列波形取得部と、(2)前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態であるいは前記光路上に前記被測定物も前記試料も配置しない状態で、前記発生部から発生されて前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算する演算部と、を備えたものである。前記演算部は、(a)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める振幅率演算部と、(b)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める位相差演算部と、(c)前記所定周波数の前記振幅率

及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める逐次近似部と、を有する。そして、この第6の態様では、前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を無視したものであり、前記逐次近似部は、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率及び光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得るものである。

【0026】本発明の第7の態様による測定装置は、被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定装置であって、(1)テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを含み、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を透過して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する計測時系列波形取得部と、(2)前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態であるいは前記光路上に前記被測定物も前記試料も配置しない状態で、前記発生部から発生されて前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算する演算部と、を備えたものである。前記演算部は、(a)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める振幅率演算部と、(b)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める位相差演算部と、(c)前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める逐次近似部と、を有する。そして、この第7の態様では、前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を反映したものであり、前記逐次近似部は、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率、及び、前記多重反射に基づく項を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近

似解を得るものである。

【0027】本発明の第8の態様による測定装置は、被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定装置であって、(1)テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを含み、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を反射して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する計測時系列波形取得部と、(2)前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態で、前記発生部から発生され前記試料を反射して前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算する演算部と、を備えたものである。前記演算部は、(a)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める振幅率演算部と、(b)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める位相差演算部と、(c)前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める逐次近似部と、を有する。そして、この第8の態様では、前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を無視するとともに、前記被測定物の前記検出部側の面で1回のみ反射した光及び前記被測定物の前記検出部と反対側の面で1回のみ反射した光を反映したものであり、前記逐次近似部は、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周囲の媒質から前記被測定物へ入射するときの透過率及び反射率、並びに、光が前記被測定物から前記媒質へ射出するときの透過率及び反射率を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得るものである。

【0028】本発明の第9の態様による測定装置は、被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を測定する測定装置であって、(1)テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを含み、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を反射して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する計測時系列

波形取得部と、(2)前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態で、前記発生部から発生される前記試料を反射して前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の複素屈折率又は複素誘電率を演算する演算部と、を備えたものである。前記演算部は、(a)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の振幅との比である前記所定周波数の振幅率を求める振幅率演算部と、(b)前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た前記所定周波数の位相との位相差を求める位相差演算部と、(c)前記所定周波数の前記振幅率及び前記所定周波数の前記位相差と前記被測定物の前記所定周波数の複素屈折率又は複素誘電率との関係を示す式に基づいて、逐次近似により当該複素屈折率又は複素誘電率を求める逐次近似部と、を有する。そして、この第9の態様では、前記式は、前記テラヘルツパルス光の前記被測定物の内部での多重反射を反映したものであり、前記逐次近似部は、前記逐次近似において、複素屈折率又は複素誘電率の近似解を与えて複素屈折率又は複素誘電率の新たな近似解を得るに際し、光が前記被測定物の周面の側面から前記被測定物へ入射するときの透過率及び反射率、光が前記被測定物から前記側面へ射出するときの透過率及び反射率、並びに、前記多重反射に基づく項を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得るものである。

【0029】前記第6乃至第9の態様によれば、前記第1乃至第4の態様による測定方法をそれぞれ実現することができ、

【0030】本発明の第10の態様によるイメージ化装置は、被測定物の複素屈折率又は複素誘電率あるいはこれらのいずれかに基づく特性値の、分布に従って、前記被測定物をイメージ化するイメージ化装置において、前記第5乃至第9のいずれかの態様による測定装置を含むものである。この第10の態様によれば、前記第5の態様によるイメージ化方法を実現することができる。

【0031】

【発明の実施の形態】以下、本発明による測定方法及び装置、並びに、イメージ化方法及び装置について、図面を参照して説明する。

【0032】[第1の実施の形態]

【0033】図1は、本発明の第1の実施の形態によるイメージ化装置を模式的に示す概略構成図である。図2は、本実施の形態における被測定物20の測定部位付近の様子を模式的に示す図である。図3は、本実施の形態によるイメージ化装置の制御・演算処理部23の動作を示す概略フローチャートである。

【0034】本実施の形態によるイメージ化装置では、

図1に示すように、レーザ光源等からなるフェムト秒パルス光源1から放射されたフェムト秒パルス光L1が、ビームスプリッタ2で2つのパルス光L2、L3に分割される。

【0035】一方のパルス光L2は、テラヘルツ光発生器7を励起して発生器7にテラヘルツパルス光を発生させるためのポンプパルス(パルス励起光)となる。このポンプパルスL2は、チョッパ3によりチョッピングされた後に、平面反射鏡4、5、6を経て、テラヘルツ光発生器7へ導かれる。他方のパルス光L3は、テラヘルツパルス光を検出するタイミングを定めるブローブパルス(サンプリングパルス光)となる。このブローブパルスL3は、平面反射鏡8、2枚もしくは3枚の平面反射鏡が組み合わされてなる可動鏡9、及び平面反射鏡10を経て、テラヘルツ光検出器11へ導かれる。

【0036】ブローブパルスL3の光路上に配置された可動鏡9は、制御・演算処理部23による制御下で、移動機構12により矢印X方向に移動可能となっている。可動鏡9の移動量に応じて、ブローブパルスL3の光路長が変わり、ブローブパルスL3が検出器11へ到達する時間が遅延する。すなわち、本実施の形態では、可動鏡9及び移動機構12が、ブローブパルスL3の時間遅延装置を構成している。

【0037】発生器7に導かれたポンプパルスL2により、発生器7が励起されてテラヘルツパルス光L4を放射する。テラヘルツパルス光L4としては、概ね0.1×10¹²から100×10¹²ヘルツまでの周波数領域の光が望ましい。このテラヘルツパルス光L4は、放射部鏡等の曲面鏡13、14を経て集光位置に集光される。本実施の形態では、この集光位置には、被測定物20の測定部位が配置される。ここでは、被測定物20は、厚みdが既知の平行平板をなす板状部材とされ、均一な物質で構成されているものとする。もっとも、被測定物20はこれに限定されるものではなく、例えば、テラヘルツパルス光を局所的に照射する場合には、厚みdは既知であれば測定部位毎に異なってもよい。被測定物20は、テラヘルツパルス光L4の被測定物20に対する光軸が被測定物20の面の法線とほぼ一致するように、配置されている。測定精度を高めるためには入射角度分布が狭い方がよいので、被測定物20に入射するテラヘルツパルス光L4の最も外側の光線と光軸とのなす角が小さい方がよい。一方、イメージとして空間分解能を高めるためには、前記角度が大きい方がよいため、必要に応じて前記角度を決定する必要がある。イメージが不必要な場合には、図面には示していないが、テラヘルツパルス光L4が被測定物20に対して平行光として入射するような照射光学系を採用した方が、測定精度を向上させる上でより好ましい。以下の説明では、テラヘルツパルス光が被測定物20に垂直に入射するものとして説明するが、斜入射の場合も同様である。

【0038】また、本実施の形態では、被測定物20は、ステージ等の移動機構26によって、被測定物20の面内の方向に2次元的に移動可能となっている。これにより、被測定物20の測定部位を2次元的に走査し得るようになっている。

【0039】被測定物20を透過したテラヘルツパルス光L5は、放物面鏡等の曲面鏡15、16を経て、検出器11により検出されて電気信号に変換される。

【0040】フェムト秒パルス光源1から放射されるフェムト秒パルス光L1の繰り返し周期は、数KH_zからMH_zオーダーである。したがって、発生器7から放射されるテラヘルツパルス光L4も、数KH_zからMH_zオーダーの繰り返しで放射される。現在の検出器11では、このテラヘルツパルス光の波形を瞬時に、その形状のまま計測することは不可能である。

【0041】したがって、本実施の形態では、同じ波形のテラヘルツパルス光L4が数KH_zからMH_zオーダーの繰り返しで到来することを利用して、ポンプパルスL2とプローブパルスL3との間に時間遅延を設けてテラヘルツパルス光L5の波形を計測する、いわゆるポンプ-プローブ法を採用している。すなわち、テラヘルツ光発生器7を作動させるポンプパルスL2に対して、テラヘルツ光検出器11を作動させるタイミングを τ 秒だけ遅らせることにより、 τ 秒だけ遅れた時点でのテラヘルツパルス光L5の電場強度を検出器11で測定できる。言い換えれば、プローブパルスL3は、テラヘルツ光検出器11に対してゲートをかけていることになる。また、可動鏡9を徐々に移動させることは、遅延時間 τ を徐々に変えることにほかならない。前記時間遅延装置によってゲートを開けるタイミングをずらしながら、繰り返し到来するテラヘルツパルス光L5の各遅延時間 τ ごとの時点の電場強度を検出器11から電気信号として順次得ることによって、テラヘルツパルス光L5の電場強度の時系列波形E(t)を計測することができる。

【0042】なお、テラヘルツ光検出器11は、プローブパルスL3を受けた時のみ光起電キャリアを生ずるようになっており、同時にテラヘルツパルス光の電場がかかっていれば、その電場に比例した光伝導電流が流れる。このとき測定される電流J(t)は、テラヘルツパルス光の電場E(t)と光起電キャリアの光伝導度 $g(t-\tau)$ のコンボリューションで表せ、 $J(t) = \int E(t) g(t-\tau) d\tau$ のような形で書ける。光伝導度 $g(t-\tau)$ がデルタ関数的であるので、測定された電流値J(t)は到来するテラヘルツパルス光L5の電場強度E(t)に比例すると考えてよい。検出器11からの電気信号は、増幅器21で増幅された後に、A/D変換器22によりA/D変換される。

【0043】本実施の形態では、テラヘルツパルス光L5の電場強度の時系列波形E(t)の計測時には、制御・演算処理部23が、移動機構12に制御信号を与え

て、前記遅延時間 τ を徐々に変化させながら、A/D変換器22からのデータを制御・演算処理部23内の図示しないメモリに順次格納する。これによって、最終的に、テラヘルツパルス光L5の電場強度の時系列波形E(t)を示すデータ全体をメモリに格納する。そして、制御・演算処理部23が、移動機構26に制御信号を与えて、被測定物20の測定部位を2次元的に順次走査させ、各測定部位についてそれぞれ、時系列波形E(t)を示すデータ全体をメモリに格納する。

【0044】ここでは、発生器7と検出器11との間の光路（本実施の形態では、図1に示すテラヘルツパルス光L4の発光位置）に被測定物20が配置された状態で、前述したようにして計測される、テラヘルツパルス光の電場強度の時系列波形E(t)を、計測時系列波形E_測(t)と呼ぶ。

【0045】以上の説明からわかるように、本実施の形態では、前述した要素1~16、21、22、26と、制御・演算処理部23が前述した移動機構12、26を制御する機能と、制御・演算処理部23がA/D変換器22からデータを取り込む機能とが、各測定部位について計測時系列波形E_測(t)を取得する計測時系列波形取得部を構成している。制御・演算処理部23は、後述する図3に示す動作を行うが、例えば、コンピュータを用いて構成することができる。

【0046】ここで、本実施の形態で採用されている、計測時系列波形E_測(t)に基づいて被測定物20の複素屈折率N(ω)を求める手法について、説明する。

【0047】発生器7と検出器11との間の光路上に被測定物20を配置しない状態で、計測時系列波形E_測(t)の場合と同様に、テラヘルツパルス光の電場強度の時系列波形E(t)を、予め計測しておく。この時系列波形E(t)を基準時系列波形E_基(t)と呼ぶ。

【0048】基準時系列波形E_基(t)について、次の数1で定義されるようなフーリエ変換を実行して、参照用（基準用）の振幅|E_基(ω)|と位相θ_基(ω)を得る。また、計測時系列波形E_測(t)について、次の数2で定義されるようなフーリエ変換を実行して、振幅|E_測(ω)|と位相θ_測(ω)を得る。

【0049】
【数1】
$$E(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E(t) \exp(i\omega t) dt = |E(\omega)| \exp[i\theta(\omega)]$$

【0050】さらに、次の数3に従って、被測定物20の複素屈折率透過率t(ω)を求める。すなわち、振幅|E_基(ω)|と振幅|E_測(ω)|と比である屈折率透過率T(ω)を得るとともに、位相θ_基(ω)と位相θ_測(ω)との位相差φ(ω)を得る。

【数2】

$$E(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E(t) \exp(i\omega t) dt = |E(\omega)| \exp[i\theta(\omega)]$$

【0051】

【0052】

【数2】

$$t(\omega) = \frac{E_{\text{trans}}(\omega)}{E_{\text{inc}}(\omega)} = \frac{|E_{\text{trans}}(\omega)|}{|E_{\text{inc}}(\omega)|} \exp[i\{\theta_{\text{trans}}(\omega) - \theta_{\text{inc}}(\omega)\}] \\ = T(\omega)e^{i\phi(\omega)}$$

【0052】一方、物質（被測定物20）の複素振幅透過率 $t(\omega)$ は、物質の複素屈折率 $N(\omega)$ で表すことができる。今、光が媒質から物質に入射するときの複素透過率及び複素反射率をそれぞれ $t_1(\omega)$ 、 $r_1(\omega)$ とし、物質から媒質へ射出するときの複素透過率及び複素反射率をそれぞれ $t_2(\omega)$ 、 $r_2(\omega)$ とすると、これらの値は、次の数3～数6で示すように、物質の複素屈折率 $N(\omega)$ を用いて表される。ただし、ここでは、被測定物20が真空中又は真空中にあるものとして、被測定物20の両側の媒質の屈折率 n_0 は1とした。もっとも、それ以外の場合でも同様であり、入射側と射出側の媒質が同一である必要もない。

【0053】

【数3】

$$t_1(\omega) = \frac{2}{N(\omega) + 1}$$

【0054】

【数4】

$$r_1(\omega) = \frac{1 - N(\omega)}{1 + N(\omega)}$$

【0055】

【数5】

$$t_2(\omega) = \frac{2N(\omega)}{N(\omega) + 1}$$

【0056】

【数6】

$$r_2(\omega) = \frac{N(\omega) - 1}{N(\omega) + 1} = -r_1(\omega)$$

【0057】また、被測定物20の複素屈折率 $N(\omega)$ は、 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ を実数として、次の数7で

$$A = t_1(\omega) \cdot t_2(\omega) \times \sum_{l=0}^m \{r_2(\omega)\}^{2l} \exp\left[i\left\{2l \cdot N(\omega) \cdot \frac{\omega}{c} d\right\}\right] \\ = |A| \cdot \exp(i \arg A)$$

【0058】数8に数2及び数7を代入すると、次の数10が得られる。数10は、振幅透過率 $T(\omega)$ 及び位相差 $\phi(\omega)$ と複素屈折率 $N(\omega) = n_s(\omega) + i n_i(\omega)$ との関係を示す式であり、 $m=0$ とすると多重反射を無視したものとなり、 $m \geq 1$ とすると多重反射を

表される。

【0058】

【数7】

$$N(\omega) = n_s(\omega) + i n_i(\omega)$$

【0059】被測定物20を透過するテラヘルツパルス光には、図2(a)に示すように被測定物20の内部で反射せずに透過する光（多重反射でない透過光）、図2(b)に示すように被測定物20の内部で2回反射して透過する光（1回多重反射した光）、図2(c)に示すように被測定物20の内部で4回反射して透過する光（2回多重反射した光）、図2(d)に示すように被測定物20の内部で2回反射して透過する光（1回多重反射した光）が含まれる。ここで、 l は0以上の整数である。

【0060】 m 回までの多重反射を考慮すると、複素振幅透過率 $t(\omega)$ は、 ω を光の角周波数、 d を被測定物20の厚さ、 c を光速として、次の数8で表される。ただし、数8において、 A は次の数9で示すように置いた。

【0061】

【数8】

$$t(\omega) = t_1(\omega) \cdot t_2(\omega) \cdot \exp\left[i\left\{N(\omega) - 1\right\} \frac{\omega}{c} d\right] \\ \times \sum_{l=0}^m \{r_2(\omega)\}^{2l} \exp\left[i\left\{2l \cdot N(\omega) \cdot \frac{\omega}{c} d\right\}\right] \\ = \exp\left[i\left\{N(\omega) - 1\right\} \frac{\omega}{c} d\right] \times A$$

【0062】

【数9】

【0063】数8に数2及び数7を代入すると、次の数10が得られる。数10は、振幅透過率 $T(\omega)$ 及び位相差 $\phi(\omega)$ と複素屈折率 $N(\omega) = n_s(\omega) + i n_i(\omega)$ との関係を示す式であり、 $m=0$ とすると多重反射を無視したものとなり、 $m \geq 1$ とすると多重反射を反映したものとなる。本実施の形態では、 $E(t)$ の測定は移動機構12の長さによって定まる最大遅延時間で打ち切られる。このとき、被測定物20の厚さ d とおおまかな屈折率がわかっているれば、前記最大遅延時間内に起こりうる多重反射の回数がわかる。直接、計測時系列

形状から判別可能な場合もある。複素屈折率の測定精度をより高めるためには、 m を前記多重反射の回数と一致させることが好ましいが、本実施の形態では、多重反射を無視しても考慮してもよく、 $m \geq 0$ の任意の整数に設

$$T(\omega)e^{i\phi(\omega)} = \exp\left[i\{n_s(\omega) + in_t(\omega) - 1\}\frac{\omega}{c}d\right] \times |A| \cdot \exp(i \arg A)$$

【0065】数10の両辺の対数をとると、次の数11が得られる。

$$\ln T(\omega) + i\phi(\omega) = i\{n_s(\omega) + in_t(\omega) - 1\}\frac{\omega}{c}d + \ln|A| + i \arg A$$

【0067】数11の実部及び虚部について、それぞれ数12及び数13の関係が成立する。

【0068】

【数12】

$$\ln T(\omega) = -n_t(\omega)\frac{\omega}{c}d + \ln|A|$$

【0069】

【数13】

$$\phi(\omega) = \{n_s(\omega) - 1\}\frac{\omega}{c}d + \arg A$$

【0070】 $n_s(\omega)$ は数13から次の数14で表され、 $n_t(\omega)$ は数12から次の数15で表される。

【0071】

【数14】

$$n_s(\omega) = \frac{c}{d\omega} \{\phi(\omega) - \arg A\} + 1$$

【0072】

【数15】

$$n_t(\omega) = \frac{c}{d\omega} \ln \frac{|A|}{T(\omega)}$$

【0073】数14及び数15において、振幅透過率 $T(\omega)$ 及び位相差 $\phi(\omega)$ は、前述したように測定値から求まる値であるが、 A が $n_s(\omega)$ 及び $n_t(\omega)$ に依存している(数9、数3、数5～数7)ため、数14及び数15をそのまま解くことは非常に困難である。

【0074】本発明者は、 A を数9のように置いて数10から数14及び数15を導くことによって初めて、次のような逐次近似を行えば、前述した論文開示されている測定方法と異なり評価関数を用いることなく、極めて簡単な計算によって、計算量を低減しかつ安定して精度良く複素屈折率($n_s(\omega)$ 及び $n_t(\omega)$)を求めることを見出した。

【0075】すなわち、まず、 $n_s(\omega)$ 及び $n_t(\omega)$ の適当な初期値(例えば、被測定物20の複素屈折率のおおよその値は通常既知であるので、この値を初期値とすればよい。)を近似解として与える。その近似解を数9に代入して A (すなわち、 $|A|$ 及び \arg

定しておけばよい。なお、 $m=0$ とすると、 $A=t$ 、 $(\omega) \cdot t$ 、 (ω) となる。

【0064】

【数10】

【0066】

【数11】

A)を計算する。 A の計算の際には、数9、数5～数7を用いる。計算した A を、与えた近似解により定まる既知数として取り換えて、数14及び数15に代入して、 $n_s(\omega)$ 及び $n_t(\omega)$ の値を計算する。これにより得た $n_s(\omega)$ 及び $n_t(\omega)$ を新たな近似解として、同様の手順を $n_s(\omega)$ 及び $n_t(\omega)$ の値が収束するまで繰り返すことによって、複素屈折率 $N(\omega) = n_s(\omega) + in_t(\omega)$ を求めることができる。

【0076】このように、逐次近似において、複素屈折率の近似解を与えて複素屈折率の新たな近似解を得るに際し、 A を、与えた近似解にて定まる既知数として取り換えることにより、新たな近似解を得る。つまり、 $m=0$ の場合(すなわち、多重反射を無視する場合)は、光が被測定物20の周囲の媒質から被測定物20へ入射するときの透過率 t 、及び光が被測定物20から媒質へ射出するときの透過率 t 、を、与えた近似解にて定まる既知数として取り換えることにより、新たな近似解を得る。また、 $m \geq 1$ の場合(すなわち、多重反射を考慮する場合)は、光が被測定物20の周囲の媒質から被測定物20へ入射するときの透過率 t_i 、光が被測定物20から媒質へ射出するときの透過率 t_r 、並びに、多重反射に基づく項(数9中の Σ の項)を、与えた近似解にて定まる既知数として取り換えることにより、新たな近似解を得る。

【0077】再び図1を参照すると、制御・演算処理部23は、被測定物20の各測定部位について、前述した演算により複素屈折率を求める。画像処理部24は、制御・演算処理部23により得られた被測定物20の複素屈折率の分布を示す画像データを生成し、その画像をCRT等の表示部25に表示させる。

【0078】次に、本実施の形態における制御・演算処理部23の動作の一例について、図3を参照して説明する。制御・演算処理部23は、動作を開始すると、基準時系列波形 $E_{in}(t)$ を計測し(ステップS1)、基準時系列波形 $E_{in}(t)$ をフーリエ変換して振幅 $|E_{in}(\omega)|$ 及び位相 $\theta_{in}(\omega)$ を求める(ステップS2)。次いで、制御・演算処理部23は、被測定物20の各測定部位について、計測時系列波形 $E_{out}(t)$ を計測し(ステップS3)、計測時系列波形 $E_{out}(t)$

をフーリエ変換して振幅 $|E_{\omega}|$ 及び位相 θ_{ω} 、 ω を求め(ステップS4)、振幅透過率 $T(\omega)$ 及び位相差 $\phi(\omega)$ を算出する(ステップS5)。

【0079】その後、制御・演算処理部23は、被測定物20の各測定部位について、後述するステップS6～S10の処理を行う。すなわち、ある測定部位について、初期の近似値 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ を設定し(ステップS6)、現在設定されている近似値 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ に従って前述した方法でAを計算(ステップS7)する。次に、制御・演算処理部23は、ステップS7で最新に計算されたA、並びに、当該測定部位についてステップS5で算出された振幅透過率 $T(\omega)$ 及び位相差 $\phi(\omega)$ を、数14及び数15に代入して、新たな近似解 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ を算出する(ステップS8)。次に、制御・演算処理部23は、ステップS8で最新に得られた近似解 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ が収束したか否かを判定する(ステップS9)。この判定は、例えば、ステップS8で最新に得られた近似解 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ と前回得られた近似解 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ との差(絶対値)が所定値以下であるか否かによって、行うことができる。

【0080】ステップS9で収束していないと判定されると、ステップS8で最新に得られた近似解 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ を新たな近似値として設定し(ステップS10)、ステップS7へ戻る。

【0081】一方、ステップS9で収束したと判定されると、制御・演算処理部23は、当該測定部位についての演算を終了し、残りの測定部位についてステップS6～S10を繰り返す。全ての測定部位について、ステップS9で収束したと判定されると、各測定部位について、収束した近似解 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ (すなわち、当該測定部位の複素屈折率)を画像処理部に24に供給して、複素屈折率の分布を示す画像を表示部25に表示させ(ステップS11)、動作を終了する。

【0082】なお、ステップS1、S2は、被測定物20の複素屈折率測定の際に行う必要はなく、適宜の頻度で行ってもよい。例えば、製品出荷時などに最初に1回行うのみでもよい。

【0083】本実施の形態によれば、前述した論文に開示されている測定方法と異なり評価関数を用いることなく、計算量を低減しつつ安定して精度良く複素屈折率又は複素誘電率を測定することができる。

【0084】ところで、本実施の形態では、基準時系列波形 $E_{\omega}(t)$ の計測の際に、前記光路上に被測定物20も他の試料も配置しなかった。しかし、被測定物20の代わりに、既知の複素屈折率及び既知の厚みを持つ試料を、前記光路上に配置した状態において、計測した時系列波形 $E(t)$ を、基準時系列波形 $E_{\omega}(t)$ として用いてもよい。

【0085】また、多くの場合透過率は1とみなせるた

め、複素屈折率 $N(\omega)$ と複素誘電率 $\epsilon(\omega)$ の間には、次の数16の関係がある。したがって、前述した方法によって求めた複素屈折率 $N(\omega)$ から、数16に従って、複素誘電率 $\epsilon(\omega)$ を求めることができることは明らかである。また、数16を数3～数15に代入しておけば、複素屈折率 $N(\omega)$ を求めることなく、複素屈折率 $N(\omega)$ の場合と同様に、複素誘電率 $\epsilon(\omega)$ を求めることも可能である。

【0086】

【数16】

$$\epsilon(\omega) = N(\omega)^2$$

【0087】[第2の実施の形態]

【0088】図4は、本発明の第2の実施の形態によるイメージ化装置を模式的に示す概略構成図である。図5は、本実施の形態における被測定物20の測定部位付近の様子を模式的に示す図である。図6は、本実施の形態によるイメージ化装置の制御・演算処理部23の動作を示す概略フローチャートである。

【0089】図4において、図1中の要素と同一又は対応する要素には同一符号を付し、その重複する説明は省略する。

【0090】本実施の形態によるイメージ化装置が前記第1の実施の形態と異なる所は、前記第1の実施の形態では、被測定物20の透過光が検出器11で検出されるのに対し、本実施の形態では、被測定物20の反射光が検出器11で検出されるように構成されている点と、制御・演算処理部23の動作である。

【0091】前記第1の実施の形態では、被測定物20の各測定部位について、透過光に関する計測時系列波形 $E_{\omega}(t)$ を取得していたのに対し、本実施の形態では、同様の手法により、被測定物20の各測定部位について、反射光に関する計測時系列波形 $E_{\omega}'(t)$ を取得する。

【0092】ここで、本実施の形態で採用されている、計測時系列波形 $E_{\omega}'(t)$ に基づいて被測定物20の複素屈折率 $N(\omega)$ を求める手法について、説明する。

【0093】発生源7と検出器11との間の光路上に、被測定物20に代えて、既知の複素屈折率及び既知の厚みを持つ試料(反射率がほぼ100%の試料が好ましい。)を配置した状態で、計測時系列波形 $E_{\omega}'(t)$

(t)の場合と同様に、反射光に関するテラヘルツパルス光の電場強度の時系列波形 $E(t)$ を、予め計測しておく。この時系列波形 $E(t)$ を基準時系列波形 $E_{\omega}'(t)$ と呼ぶ。

【0094】基準時系列波形 $E_{\omega}'(t)$ について、前記数1で定義されるようなフーリエ変換を実行して、参照用(基準用)の振幅 $|E_{\omega}'(\omega)|$ と位相 $\theta_{\omega}'(\omega)$ を得る。また、計測時系列波形 $E_{\omega}'(t)$

(1) について、前記第 1 で定義されるようなフーリエ変換を実行して、振幅 $|E_{\text{inc}}'|(\omega)|$ と位相 $\theta_{\text{inc}}'(\omega)$ を得る。

【0095】さらに、次の数 17 に従って、被測定物 20 の複素振幅反射率 $r(\omega)$ を求める。すなわち、振幅 $|E_{\text{inc}}'|(\omega)|$ と振幅 $|E_{\text{ref}}'|(\omega)|$ と比である

$$r(\omega) = \frac{E_{\text{ref}}'(\omega)}{E_{\text{inc}}'(\omega)} = \frac{|E_{\text{ref}}'|(\omega)}{|E_{\text{inc}}'|(\omega)} \exp[i\{\theta_{\text{ref}}'(\omega) - \theta_{\text{inc}}'(\omega)\}]$$

$$= R(\omega)e^{i\phi(\omega)}$$

【0097】一方、物質（被測定物 20）の複素振幅反射率 $r(\omega)$ は、物質の複素屈折率 $N(\omega)$ で表すことができる。

【0098】被測定物 20 で反射するテラヘルツパルス光には、図 5 (a) に示すように被測定物 20 の入射面（検出部 11 側の面）でのみ反射する光（内部で 1 回も反射せず、多重反射でない反射光）、図 5 (b) に示すように被測定物 20 の検出部 11 と反対側の面で 1 回のみ反射する光（内部で 1 回反射するが、多重反射でない反射光）、図 5 (c) に示すように被測定物 20 の内部で 3 回反射した光（1 回多重反射した光）、図 5

(d) に示すように被測定物 20 の内部で $(2i-1)$ 回反射した光（ $(1-1)$ 回多重反射した光）が含まれる。ここで便宜上、図 5 (b) に示した光を 0 回多重反射した光、図 5 (a) に示した光を -1 回多重反射した光と呼ぶことにすると、 i は 0 以上の整数である。なお、図 5 において、反射回数 i は、被測定物 20 の内部での反射回数を示している。

【0099】 $(m'-1)$ 回までの多重反射（但し、 $m' > 0$ ）を考慮すると、複素振幅反射率 $r(\omega)$ は、

$$r(\omega) = -\left[r_1(\omega) + t_1(\omega) \cdot r_2(\omega) \cdot t_2(\omega) \cdot \exp\left[i\left\{2N(\omega) \cdot \frac{\omega}{c} d\right\}\right] \right]$$

$$\times \sum_{i=0}^{m'-1} \{r_2(\omega)\}^{2i} \exp\left[i\left\{2i \cdot N(\omega) \cdot \frac{\omega}{c} d\right\}\right] \quad]$$

$$= -r_1(\omega) + \exp\left[i\left\{2N(\omega) \cdot \frac{\omega}{c} d\right\}\right] \times B$$

【0101】

【数 19】

$$B = -t_1(\omega) \cdot r_2(\omega) \cdot t_2(\omega)$$

$$\times \sum_{i=0}^{m'-1} \{r_2(\omega)\}^{2i} \exp\left[i\left\{2i \cdot N(\omega) \cdot \frac{\omega}{c} d\right\}\right]$$

$$= |B| \cdot \exp(i \arg B)$$

【0102】数 18 に数 17 を代入して整理すると、次の数 20 が得られる。数 20 は、振幅反射率 $R(\omega)$ と位相 $\phi'(\omega)$ と複素屈折率 $N(\omega) = n_s(\omega)$

+ $i n_i(\omega)$ との関係を示す式であり、 $m' = 0$ または 1 とすると多重反射を無視したものとなり、 $m' = 1$ とすると被測定物 20 の検出部 11 側の面で 1 回のみ反射

振幅反射率 $R(\omega)$ を得るとともに、位相 $\theta_{\text{inc}}'(\omega)$ と位相 $\theta_{\text{ref}}'(\omega)$ との位相差 $\phi'(\omega)$ を得る。

【0096】

【数 17】

ω を光の角周波数、 d を被測定物 20 の厚さ、 c を光速として、次の数 18 で表される。ただし、数 18 において、 B は次の数 19 で示すように置いた。なお、数 18 において、前記第 1 の実施の形態の場合と同様に、光が媒質から物質に入射するときの複素透過率及び複素反射率をそれぞれ $t_1(\omega)$ 、 $r_1(\omega)$ とし、物質から媒質へ射出するときの複素透過率及び複素反射率をそれぞれ $t_2(\omega)$ 、 $r_2(\omega)$ とし、被測定物 20 が真空中又は真空中にあるものとして、被測定物 20 の両側の媒質の屈折率 n_0 は 1 とした。もっとも、それ以外の場合でも同様であり、入射側と射出側の媒質が同一である必要もない。また、多くの分光器と同様に、本実施の形態では、前記試料としてミラーを用い、参照用の信号として当該ミラーにより反射された光のスペクトルを用い、その信号と被測定物 20 により反射されたスペクトルとの比を振幅反射率としている。そのため、数 18 では、光がミラーで反射される際の位相反転を考慮して全体が -1 倍されている。

【0100】

【数 18】

した光及び被測定物 20 の検出部 11 と反対側の面で 1 回のみ反射した光を反映したものとなり、 $m' \geq 2$ すると多重反射を反映したものとなる。複素屈折率の測定精度をより高めるためには $m' \geq 2$ とすることが好ましいが、本実施の形態では、多重反射を無視しても考慮し

てもよく、 m' は 1 の任意の整数に設定しておけばよい。なお、 $m' = 0$ とすると、 $B = 0$ になるものとする。

【0103】

【数 20】

$$R(\omega)e^{i\phi(\omega)} + r_1(\omega) = \exp \left[2i \left\{ n_R(\omega) + i n_I(\omega) \right\} \frac{\omega}{c} d \right] \times |B| \cdot \exp(i \arg B)$$

【0104】数 20 の左辺を次の数 21 で示すように置き、これを数 20 に代入すると、次の数 22 が得られ

【0106】

【0105】

【数 22】

【数 21】

$$R'(\omega)e^{i\phi''(\omega)} = \exp \left[2i \left\{ n_R(\omega) + i n_I(\omega) \right\} \frac{\omega}{c} d \right] \times |B| \cdot \exp(i \arg B)$$

【0107】数 22 の両辺の対数をとると、次の数 23 が得られる。

【0108】

【数 23】

$$\ln R'(\omega) + i\phi''(\omega) = 2i \left\{ n_R(\omega) + i n_I(\omega) \right\} \frac{\omega}{c} d + \ln |B| + i \arg B$$

【0109】数 23 の両辺の虚部及び実部の関係から、 $n_R(\omega)$ は次の数 24 で表され、 $n_I(\omega)$ は次の数 25 で表される。

【0110】

【数 24】

$$n_R(\omega) = \frac{c}{2d\omega} \{ \phi''(\omega) - \arg B \}$$

【0111】

【数 25】

$$n_I(\omega) = \frac{c}{2d\omega} \ln \frac{|B|}{R'(\omega)}$$

【0112】数 24 及び数 25 において、振幅反射率 $R'(\omega)$ 及び位相差 $\phi''(\omega)$ は、前述したように測定値から求まる値であるが、 B が $n_R(\omega)$ 及び $n_I(\omega)$ に依存し（数 19、数 3、数 5～数 7）、 $R'(\omega)$ 及び位相差 $\phi''(\omega)$ が $n_R(\omega)$ 及び $n_I(\omega)$ に依存している（数 21、数 4、数 7）ので、数 24 及び数 25 をそのまま解くことは非常に困難である。

【0113】本発明者は、 B を数 19 のように置くとともに数 21 のように置いて数 20 から数 24 及び数 25 を導くことによって初めて、次のような逐次近似を行えば、極めて簡単な計算によって、比較的小さい計算量で安定して精度良く複素屈折率 $(n_R(\omega) \text{ 及び } n_I(\omega))$ を求めることを見出した。

【0114】すなわち、まず、 $n_R(\omega)$ 及び $n_I(\omega)$ の適当な初期値（例えば、被測定物 20 の複素屈折率のおおよその値は通常既知であるので、この値を初期値とすればよい。）を近似解として与える。その近

似解を数 19 に代入して B （すなわち、 $|B|$ 及び $\arg B$ ）を計算する。 B の計算の際には、数 3、数 5～数 7 を用いる。また、前記近似解を数 21 に代入して振幅反射率 $R'(\omega)$ 及び位相差 $\phi''(\omega)$ を計算する。この計算の際には、数 4 及び数 7 を用いる。このようにして計算した B 、振幅反射率 $R'(\omega)$ 及び位相差 $\phi''(\omega)$ を、与えた近似解により定まる既知数として取り換えて、数 24 及び数 25 に代入して、 $n_R(\omega)$ 及び $n_I(\omega)$ の値を計算する。これにより得た $n_R(\omega)$ 及び $n_I(\omega)$ を新たな近似解として、同様の手順を $n_R(\omega)$ 及び $n_I(\omega)$ の値が収束するまで繰り返すことによって、複素屈折率 $N(\omega) = n_R(\omega) + i n_I(\omega)$ を求めることができる。

【0115】このように、逐次近似において、複素屈折率の近似解を与えて複素屈折率の新たな近似解を得るに照し、 B 、振幅反射率 $R'(\omega)$ 及び位相差 $\phi''(\omega)$ を、与えた近似解にて定まる既知数として取り換えることにより、新たな近似解を得る。つまり、 $m' = 1$ の場合（すなわち、多重反射を無視するとともに、被測定物 20 の入射面（検出部 11 側の面）でのみ反射する光を反映する場合）は、光が被測定物 20 の周囲の媒質から被測定物 20 へ入射するときの透過率 t 、及び反射率 r_1 、並びに、光が被測定物 20 から媒質へ射出するときの透過率 t 、及び反射率 r_2 を、与えた近似解にて定まる既知数として取り換えることにより、新たな近似解を得る。また、 $m \geq 2$ の場合（すなわち、多重反射を考慮する場合）は、光が被測定物 20 の周囲の媒質から被測定物 20 へ入射するときの透過率 t 、及び反射率 r_1 、光が被測定物 20 から媒質へ射出するときの透過率 t 、

及び反射率 r_s 、並びに、多重反射に基づく項（数19中の2の項）を、与えた近似解にて定まる既知数として取り扱うことにより、新たな近似解を得る。

【0116】次に、本実施の形態における制御・演算処理部23の動作の一例について、図8を参照して説明する。制御・演算処理部23は、動作を開始すると、基準時系列波形 $E_{s,j}'(t)$ を計測し（ステップS2

1）、基準時系列波形 $E_{s,j}'(t)$ をフーリエ変換して振幅 $|E_{s,j}'(\omega)|$ 及び位相 $\theta_{s,j}'(\omega)$ を求める（ステップS22）。次いで、制御・演算処理部23は、被測定物20の各測定部位について、計測時系列波形 $E_{s,j}'(t)$ を計測し（ステップS23）、計測時系列波形 $E_{s,j}'(t)$ をフーリエ変換して振幅 $|E_{s,j}'(\omega)|$ 及び位相 $\theta_{s,j}'(\omega)$ を求め（ステップS24）、振幅反射率 $R(\omega)$ 及び位相差 $\phi'(\omega)$ を算出する（ステップS25）。

【0117】その後、制御・演算処理部23は、被測定物20の各測定部位について、後述するステップS26～S31の処理を行う。すなわち、ある測定部位について、初期の近似値 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ を設定し（ステップS26）、現在設定されている近似値 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ に従って前述した方法でBを計算（ステップS27）するとともに $R'(\omega)$ 及び $\phi''(\omega)$ を計算する（ステップS28）。なお、ステップS28では、当該測定部位についてステップS25で算出された振幅反射率 $R(\omega)$ 及び位相差 $\phi'(\omega)$ を用いる。

【0118】次いで、制御・演算処理部23は、ステップS27で最新に計算されたB、並びに、ステップS28で最新に計算された $R'(\omega)$ 及び $\phi''(\omega)$ を、数24及び数25に代入して、新たな近似解 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ を算出する（ステップS29）。次に、制御・演算処理部23は、ステップS29で最新に得られた近似解 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ が収束したか否かを判定する（ステップS30）。この判定は、例えば、ステップS29で最新に得られた近似解 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ と前回得られた近似解 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ との差（絶対値）が所定値以下であるか否かによって、行うことができる。

【0119】ステップS30で収束していないと判定されると、ステップS29で最新に得られた近似解 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ を新たな近似値として設定し（ステップS31）、ステップS27へ戻る。

【0120】一方、ステップS30で収束したと判定されると、制御・演算処理部23は、当該測定部位についての演算を終了し、残りの測定部位についてステップS26～S31を繰り返す。全ての測定部位について、ステップS30で収束したと判定されると、各測定部位についての収束した近似解 $n_s(\omega)$ 、 $n_i(\omega)$ （すなわち、当該測定部位の複素屈折率）を画像処理部24

に供給して、複素屈折率の分布を示す画像を表示部25に表示させ（ステップS32）、動作を終了する。

【0121】なお、ステップS31、S32は、被測定物20の複素屈折率測定の際に行う必要はなく、適宜の頻度で行ってもよい。例えば、製品出荷時などに最初に1回行うのみでもよい。

【0122】本実施の形態によれば、比較的少ない計算量で安定して精度良く複素屈折率又は複素誘電率を測定することができる。

【0123】なお、前述した方法によって求めた複素屈折率 $N(\omega)$ から、前記数16に従って、複素誘電率 $\epsilon(\omega)$ を求めることができることは明らかである。また、数16を数3～数7、数18～数25に代入しておけば、複素屈折率 $N(\omega)$ を求めることなく、複素屈折率 $N(\omega)$ の場合と同様に、複素誘電率 $\epsilon(\omega)$ を求めることも可能である。

【0124】以上、本発明の各実施の形態について説明したが、本発明はこれらの実施の形態に限定されるものではない。

【0125】例えば、前記各実施の形態では、被測定物20の各測定部位の複素屈折率が測定されて、その分布がイメージ化されていたが、本発明では、被測定物20のある測定部位のみの複素屈折率又は複素誘電率を測定するだけであってもよい。さらに、イメージが不要で、被測定物20のある範囲の平均の複素屈折率又は複素誘電率を測定したい場合には、前述のように、テラヘルツパルス光14が被測定物20に対して平行光として入射するような照明光学系を利用してもよい。

【0126】また、前記各実施の形態では、複素屈折率を最終的な測定結果としていたが、本発明は、他の物性値を所望の最終的な測定結果とする場合において、当該物性値を得るための途中段階として複素屈折率又は複素誘電率を得る場合にも、適用することができる。例えば、被測定物20が半導体などである場合のように複素屈折率の周波数依存性が理論的に求まる場合には、最小二乗法によりパラメータを最適化すれば、被測定物20に関する他の情報（例えば、半導体のキャリア密度や移動度など）を得ることが可能である。半導体のキャリア密度と移動度を求めたい場合であれば、単一周波数の複素屈折率から直ちに求めることができるが、より高い精度でこれらの値を求めたければ、周波数依存性を利用して最小二乗法により算出することが有効である。同様の計算は、透過又は反射スペクトルの測定値と理論値との差を最小にするようにパラメータ最適化することによっても可能であるが、これは比較的計算量が多い作業である。それよりも、本発明を用いて測定結果から複素屈折率を算出し、その結果と理論式とを比較しながらパラメータ最適化を行った方が計算量は軽減される。したがって、本発明はパラメータ最適化の前処理としても有効である。

【0127】

【実施例】本発明者は、前述した第1の実施の形態で採用されている測定手法に従って、被測定物20をn型のシリコンウエハとしてその複素屈折率を求めた。

【0128】図3中のステップS5で得た周波数0.6 THz ($\sim 20 \text{ cm}^{-1}$)における振幅透過率 $T(\omega)$ 及び位相差 $\phi(\omega)$ は、それぞれ $T(\omega) = 0.610$ 、位相差 $\phi(\omega) = 5.78$ であった。この結果に基づき、図3中のステップS9で収束したと判定され最終的に得られた複素屈折率 $N(\omega)$ は、 $n_s(\omega) = 3.44$ 及び $n_i(\omega) = 0.0027$ であった。この値は、シリコンウエハの複素屈折率として知られている値 $n_s(\omega) = 3.41$ 及び $n_i(\omega) = 0.0024$ (「基礎物性図表」：工藤孝栄(共立出版、(1972)、p. 254))に極めて近い。このように、本発明が複素屈折率を求める際に有用であることが、実験に確認された。

【0129】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、屈折率の波長依存性を求めるなどの煩雑な手順が不要となり、しかも、計算量を低減しつつ安定して精度良く複素屈折率又は複素誘電率を測定することができる測定方法及び装置、並びに、これを用いた被測定物のイメージ化方法及び装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施の形態によるイメージ化装置を模式的に示す概略構成図である。

【図2】本発明の第1の実施の形態における被測定物の測定部位付近の様子を模式的に示す図である。

【図3】本発明の第1の実施の形態によるイメージ化装置の制御・演算処理部の動作を示す概略フローチャートである。

【図4】本発明の第2の実施の形態によるイメージ化装置を模式的に示す概略構成図である。

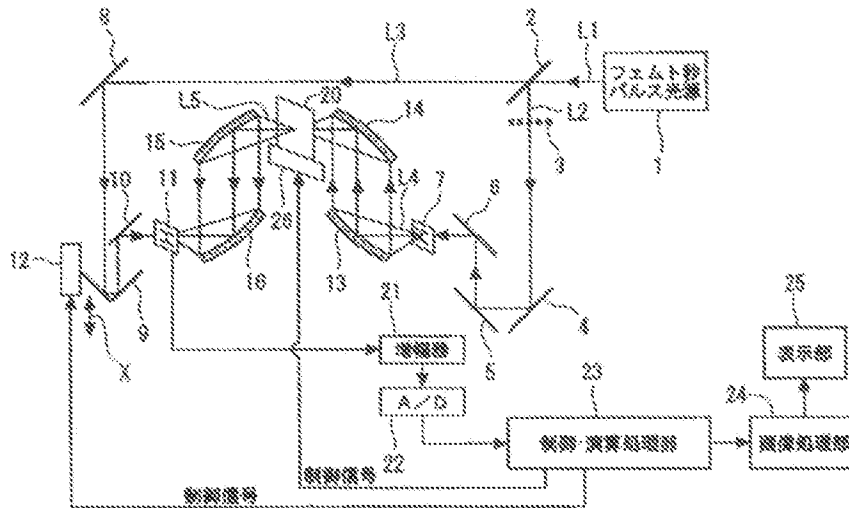
【図5】本発明の第2の実施の形態における被測定物の測定部位付近の様子を模式的に示す図である。

【図6】本発明の第3の実施の形態によるイメージ化装置の制御・演算処理部の動作を示す概略フローチャートである。

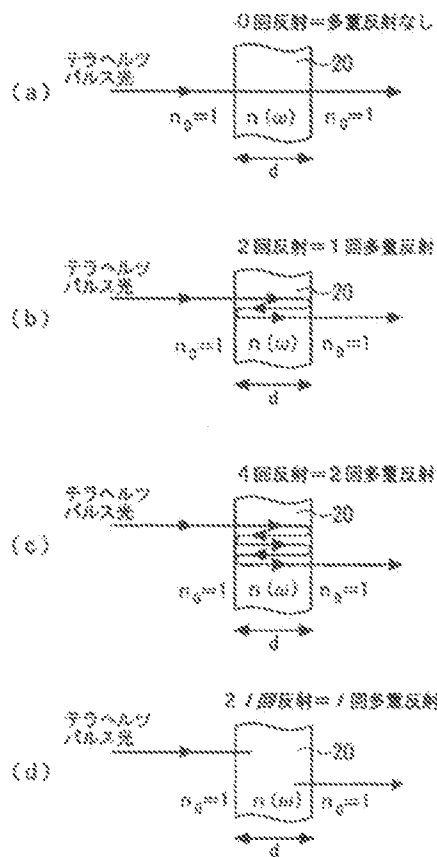
【符号の説明】

- 1 フェムト秒パルス光源
- 7 テラヘルツ光発生器
- 9 可動鏡
- 11 テラヘルツ光検出器
- 20 被測定物
- 23 制御・演算処理部
- 24 画像処理部
- 25 表示部

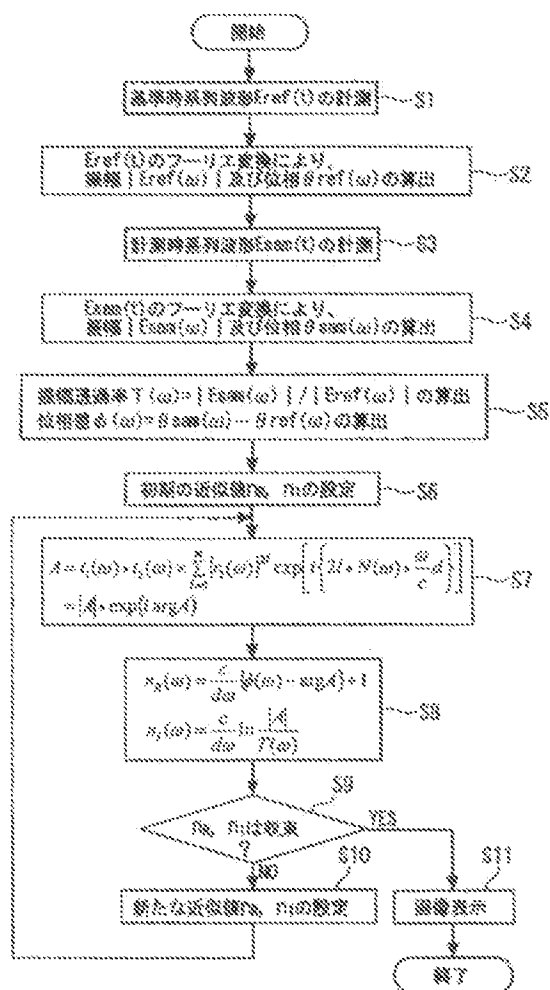
【図1】



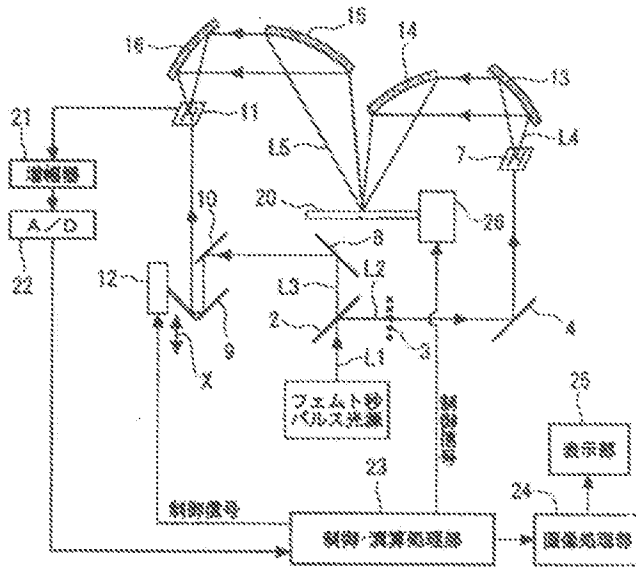
【図 2】



【図 3】



【図4】



【図5】

